

造山運動 塑造豐富礦物與岩石

在台灣這座面積僅3萬6000平方公里的小島上，竟然蘊藏了地球上常見的各樣沉積岩、火成岩、變質岩，這都歸功於一億多年來頻繁的造山運動！

撰文／楊小青、陳文山

地球具有4400多種的礦物以及百餘種岩石，若以數億乃至數十億年的長時間尺度來看地球礦物岩石的種類與分佈，地球46億年以來幾個重大的環境變動事件有決定性的影響。若是以數千萬年的時間尺度來看，地球的板塊構造運動才是造成現今礦物岩石種類、分佈的最主要因素。

礦物是一種自然產出的結晶質，具有特

定的元素組成與原子排列，因此由礦物的組成與結構，我們可以解析出礦物形成當時的物理與化學環境。礦物也是構成岩石的單元，地質學家根據岩石、礦物的組合，就可以清楚知道過去地球的板塊處於怎樣的環境，因為板塊運動的形式，決定了岩石礦物的種類與分佈。

我們可以從最近一億年以來台灣的演化歷史，來看台灣礦物岩石的形成，尤其近

影像來源：楊小青

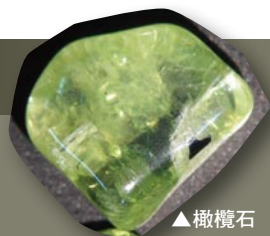
板塊構造運動與礦物種類

地球形成之初溫度很高，是個時有隕石撞擊的混沌世界，礦物以「高溫型矽酸鹽類」（如橄欖石、輝石等）以及鐵、鎳等合金或硫化物為主。約40億年前地表開始出現液態水、風化作用，之後生成了「低溫型片狀矽酸鹽」，但種類仍然有限，不超過300種。礦物種類真正有大量的分異，始於板塊構造運動與微生物的出現。

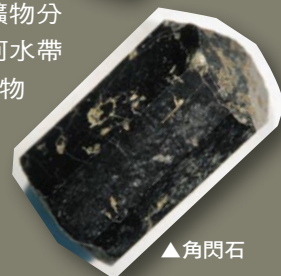
板塊的活動造成地函特定元素的富集作用，很多金屬元素在地球內部含量很低，必須有特定的地質作用（比如熱液活動）才能匯集成成特定的礦物。台灣金瓜石地區若非有熱液活動，不會形成亞洲數一數二的金銅礦。

同時，板塊構造運動也讓地底深處的物質藉由岩漿作用或是地體抬升出現於地表。

因此，當地表的風化作用把鐵鎂質礦物分解，並將鈉、鉀、鈣、鎂等元素藉由河水帶到海洋，地表僅留下抗風化的石英等礦物（沉積岩的重要組成），必須藉由火山的活動或是地體抬升露出變質岩，富含鐵鎂質的輝石、角閃石一類礦物才有機會重現於地表。



▲橄欖石



▲角閃石

600萬年以來的造山運動，更是決定今日台灣島上礦物岩石分佈的關鍵。

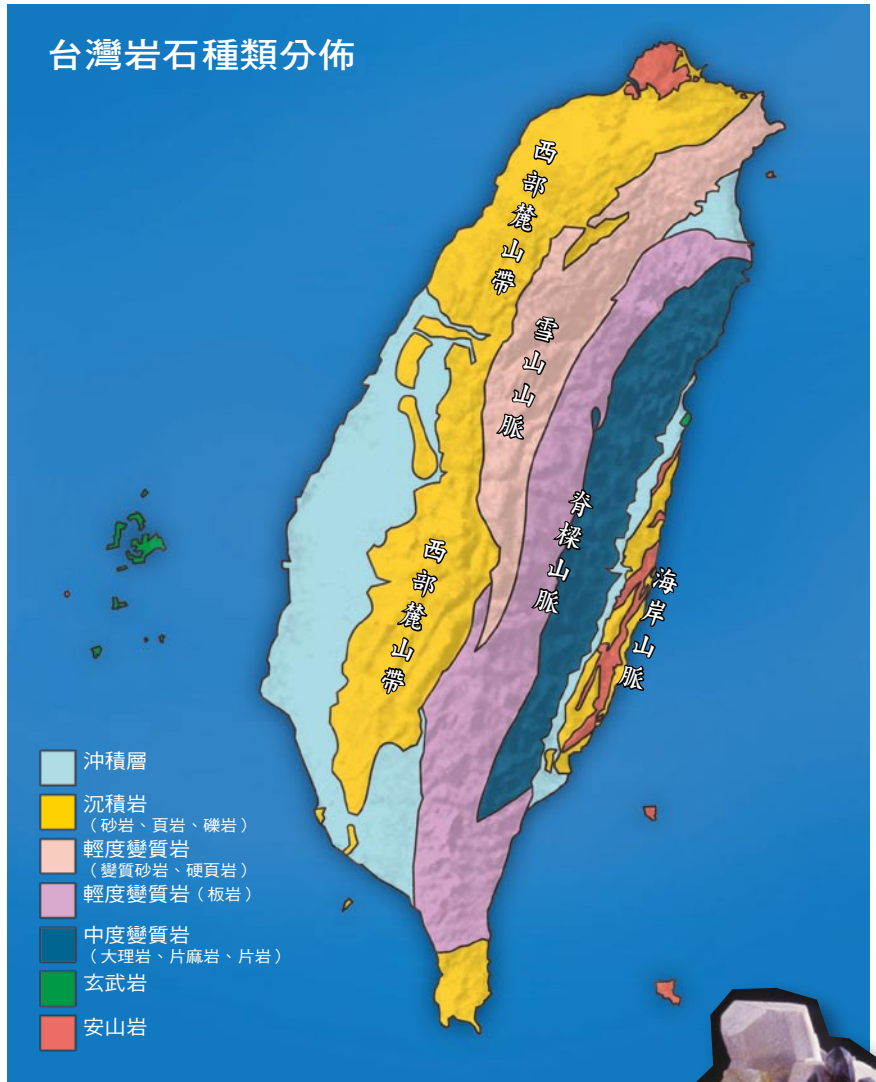
地殼運動活躍的地區，地表就會出種類繁多的岩石，台灣島是世界上最明顯的地區，雖然面積僅僅3萬6000平方公里，但是地球上最常見的各樣沉積岩、火成岩、變質岩，卻都可在這座蕞爾小島上找到。這都是因為台灣島位於現今地球上少數幾個活躍的造山帶之一，一億年以來多采多姿的活動，才會造就出豐富多樣的岩石與礦物。

變質岩在哪裡？化石在哪裡？黃金在哪裡？石油在哪裡？雖然台灣島有這麼多種岩石與礦物出露，但它們出露的地區分佈有一定規律可循，這些規律性也讓地質學家知道如何尋找它們；造山運動造成地殼隆起的過程，具有一定的運動模式，因此只要了解台灣造山運動的歷史，就能掌握台灣三大岩類（沉積岩、火成岩、變質岩）以及礦物的空間分佈。

一億年的演化史 造就台灣三大岩類

從台灣一億年以來的演化歷史來看，早期板塊環境穩定時，來自陸地表面的沉積顆粒，在現今台灣海峽一帶的大陸棚上面堆積出「沉積岩」，依不同顆粒組成、大小，而有礫岩、砂岩、泥岩、石灰岩之分。這些沉積顆粒是岩石經長期風化侵蝕

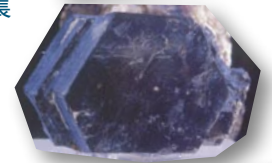
台灣岩石種類分佈



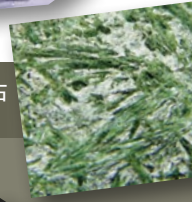
台灣西部的沉積岩來自陸地表面，這些沉積顆粒是岩石經長期風化侵蝕下來的碎屑，80%以上是石英。花東海岸山脈的隱沒作用產生安山岩，礦物以斜長石、輝石與角閃石為主，偶而有石英或黑雲母。而澎湖群島因大陸棚的張裂作用，產生玄武岩，礦物以斜長石、輝石為主。造山運動開始後，地殼遭擠壓深埋形成「變質岩」，台灣島出露的變質岩是板塊碰撞時推擠而被深埋在十數公里深以下，在高溫高壓的環境形成中度變質岩，產生的變質礦物有藍閃石、蛇紋石、陽起石、滑石、透閃石（台灣玉）。



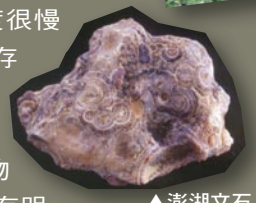
▲長石



▲黑雲母



▶陽起石



▲澎湖文石



▲台灣玉

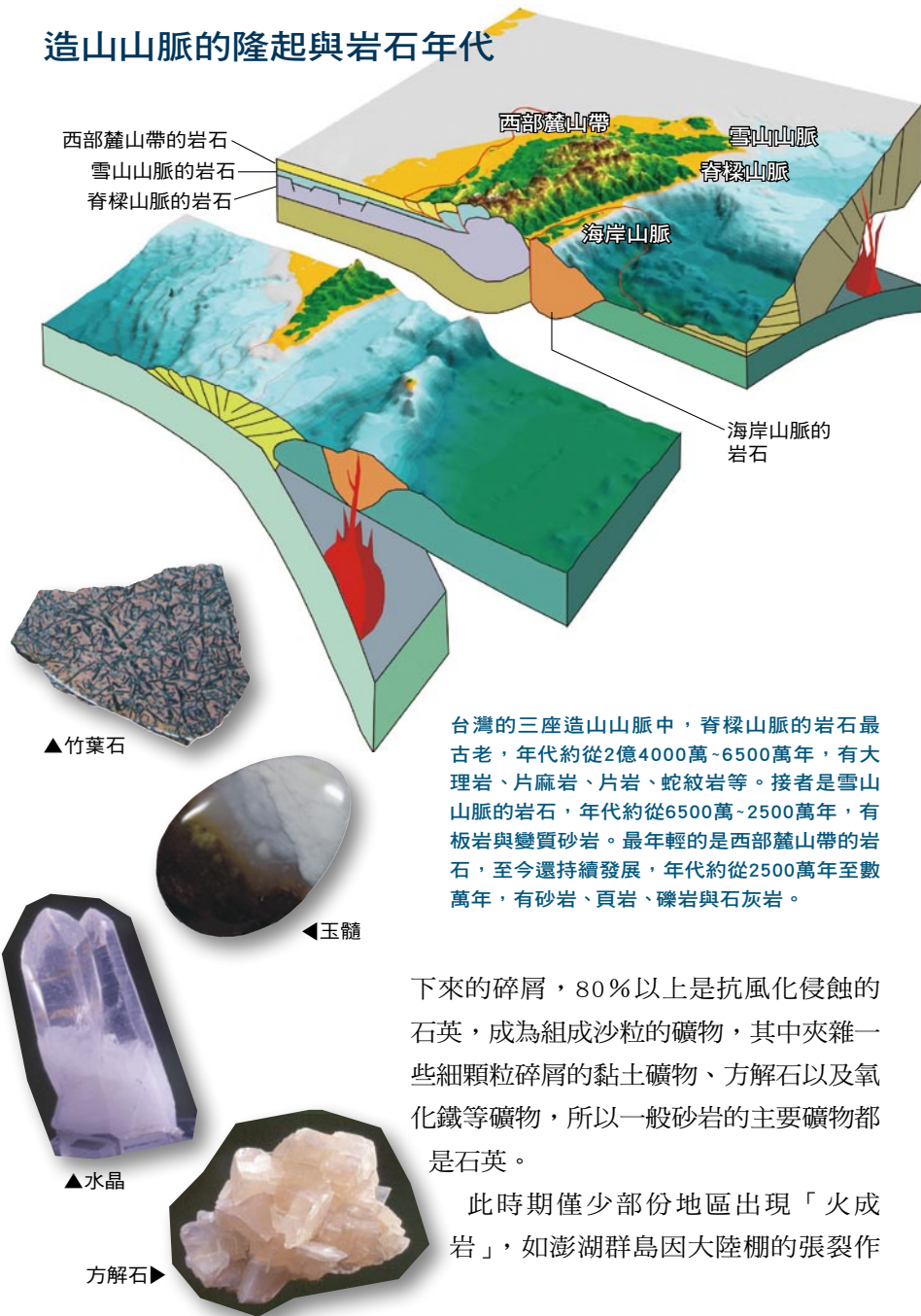
微生物對礦物生成的貢獻

30億年前，微生物對於礦物形成最大的貢獻，在於製造氧氣。太陽系的原始組成是貧氧的，地球表面以外的地區若有含鐵礦物，一般都是在還原環境下生成的磁鐵礦，很少發現赤鐵礦。30幾億年前，開始在地表繁衍的微生物釋放氧氣至大氣中，把大氣逐漸改造成太陽系中特有的富氧環境，許多氧化物與氫氧化物礦物才一一出現。這些是太陽系中非常特別的礦物，代表環境中的氧元素已經達到一定的豐度。

至今，微生物已廣佈地表，不僅促成岩石的風化與礦物的分解，同時也加速許多礦物的生成。礦物中原子的重新

排列組合，牽扯到原子間鍵結的破壞與建立。地表的低溫環境讓鍵結重新組構的速度很慢（這也是許多高溫型礦物可以在地表存在的原因），此時微生物的存在變得很重要，發揮了類似觸媒的功能，促使一些礦物很快在地表合成。但微生物能力依然有限，所以地表常溫下很少有明顯結晶的礦物生成，晶癖一般僅限於纖維狀、葡萄狀、腎狀等具有原子規則排列的晶質與無規則排列的非晶質礦物聚合體。

造山山脈的隆起與岩石年代



台灣的三座造山山脈中，脊樑山脈的岩石最古老，年代約從2億4000萬-6500萬年，有大理岩、片麻岩、片岩、蛇紋岩等。接者是雪山山脈的岩石，年代約從6500萬-2500萬年，有板岩與變質砂岩。最年輕的是西部麓山帶的岩石，至今還持續發展，年代約從2500萬年至數萬年，有砂岩、頁岩、礫岩與石灰岩。

下來的碎屑，80%以上是抗風化侵蝕的石英，成為組成沙粒的礦物，其中夾雜一些細顆粒碎屑的黏土礦物、方解石以及氧化鐵等礦物，所以一般砂岩的主要礦物都是石英。

此時期僅少部份地區出現「火成岩」，如澎湖群島因大陸棚的張裂作

用，產生玄武岩，屬於基性火成岩，礦物以斜長石、輝石為主，偶而有角閃石與橄欖石，但不會含有地球上最常見的石英。花東海岸山脈的隱沒作用產生安山岩，屬於中性火成岩，礦物以斜長石、輝石與角閃石為主，偶而有石英或黑雲母。

之後，台灣的板塊環境變得非常不穩定，進入造山運動時期，地殼遭擠壓深埋形成「變質岩」，或隱沒到地函深處形成岩漿，產生「火成岩」。台灣島出露的變質岩是板塊碰撞時推擠而被深埋在十數公里深以下高溫高壓的環境，形成中度變質岩，產生的變質礦物是在火成岩與沉積岩中無法被發現的，例如藍閃石、蛇紋石、陽起石、滑石、透閃石（台灣玉）等。

台灣的造山運動發生在600萬年前，由菲律賓海板塊上的火山島弧（現今的海岸山脈、綠島與蘭嶼）碰撞到歐亞大陸，擠壓產生「弧」「陸」碰撞的造山山脈。火山島弧與大陸的碰撞猶如推土機推起土堆：花東海岸山脈火山島弧是推土機，被推起的土堆就是台灣島的山脈。山脈無法一蹴即成，是漸次堆高、變大的，必須經過漫長的時間，才能建構高達3952公尺的玉山，成為東亞第一高峰。

當推土機（海岸山脈）逐漸向前推進，土堆（山脈）會從一個小土堆逐漸變大增高，一旦無法再壯大，會在前方又增長

岩石分佈與板塊構造運動息息相關

從地表出露的岩石比率來看，沉積岩約佔75%，火成岩約25%，變質岩佔不到1%。若由整體地殼岩石的比率來看，沉積岩約僅佔5%，火成岩（含變質岩）約佔95%，這樣的分配與地球的板塊作用息息相關。由地球表面板塊的結構來看，穩定的環境大概佔九成面積，活動的地區約佔一成。地表的變質岩與火成岩大都形成於在活動的板塊環境，尤其是變質岩，絕大部份是因為板塊碰撞所產生的，都出現在全世界的造山山脈中，台灣中央山脈的變質岩就是最明顯的例子。

因此，地殼岩石種類的演化，板塊構造運動扮演了非常

重要的角色。地球上板塊最活躍的區域在板塊的邊界，依不同運動形式，分為張裂型、聚合型與轉型斷層三種板塊邊界，也相對應著不同的岩石。在「轉型斷層型」的板塊邊界，地殼僅水平地活動，沒有大區域的地殼變動，地殼岩石的變化較單純。另外兩種活躍的板塊邊界地區，運動最為劇烈，會形成各式各樣的火成岩與變質岩。張裂型與聚合型板塊邊界會造成地殼翻天覆地的運動，地表岩石會被隱沒到地下數十到數百公里深，熔融成岩漿，或變質形成變質岩，使得地殼中的礦物與岩石產生巨大的改變，也會將地底深處的變質岩或火成岩隆起到地表。

一個新的土堆，經過周而復始的推擠，土堆（山脈）越長越高、越大也越多，地球上任何一座新生或古老的造山山脈，如喜馬拉雅山脈、阿爾卑斯山脈與台灣島的山脈，都是由一條條先後隆起的小山脈組合而成。

山脈越早隆起 出露的岩石越古老

地質學家將台灣的山脈由東向西分為「脊樑山脈」、「雪山山脈」，與「西部麓山帶」，前兩者合稱「中央山脈」（海岸山脈不屬於造山山脈）。脊樑山脈位在最東邊，平均高度最高，其次是雪山山脈，最西側的西部麓山帶最低矮，高度從兩千多公尺漸降到數十公尺高的丘陵。

造山運動除了帶來山脈的高度變化，地表出露的岩石差異也很大。因為當山脈逐漸增長變高的同時，地表會遭受風化侵蝕作用讓山脈變矮，使地表上層的年輕岩石逐漸被侵蝕，讓原來埋藏在地殼深部、高溫高壓下形成的古老變質岩，有機會出露到地表。所以，最早隆起的山脈，地表出露的岩石年代通常最老、岩石變質程度最高，較晚隆起的山脈，年代較年輕，變質程度也較低。

因此，依照前面的造山模式，山脈地表岩石的分佈就有一定的規則了。台灣的三座造山山脈中，最早隆起的是脊樑山脈，

約在600~400萬年前被推高、隆起，我們在這裡可以找到變質呈度很高的岩石（中度變質岩），同時也是台灣島最古老的岩石，有大理岩、片麻岩、片岩、蛇紋岩等，岩石的年代大約從2億4000萬~6500萬年。接者是雪山山脈，隆起時代大約在400~300萬年前，岩石變質程度較低，屬於輕度變質岩，有板岩與變質砂岩，岩石的年代大約從6500萬~2500萬年。最年輕的是西部麓山帶：隆起的時代約從200多萬年前開始，至今還持續發展，出露較淺部的沉積岩岩石，有砂岩、頁岩、礫岩與石灰岩，岩石的年代大約從2500萬年至數萬年。

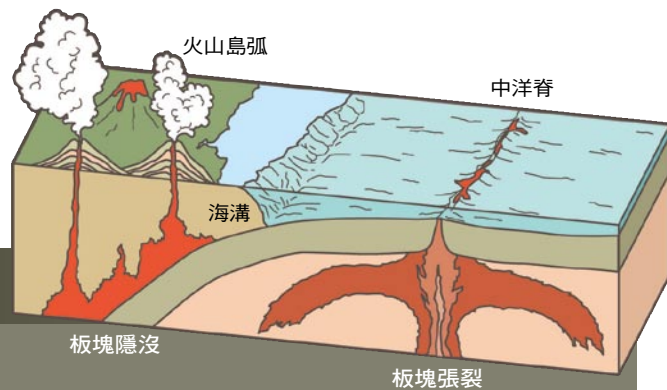
地球與太陽系其他七大行星最大的不同之處，就是活躍的「板塊運動」。持續數十億年的板塊運動，讓因侵蝕逐漸平夷的地表得到重生，不斷提供各種生物賴以生存的元素，也有多樣性的地質環境，讓生物能夠持續的演化，造就繽紛的生命世界。了解礦物、岩石與板塊構造運動的關係，不僅讓我們對大自然奇妙的運作機制更為讚歎，也更珍惜這顆充滿生機與活力的行星！

SA

關於作者



楊小青（左）為台灣大學地質科學系博士，目前擔任地球科學文教基金會執行長，長期致力於將地球科學知識推廣給一般大眾，也十分關心台灣環境變遷議題，近期與台灣考古界合作，希望可以釐清氣候等自然環境變遷與台灣史前文化演替之關聯。陳文山（右）為台灣大學地質科學系教授兼系主任。



在「張裂型」板塊邊界，板塊受到兩個背向的力量作用，地殼逐漸被拉開、分裂並且變薄，地殼下的岩漿更有機會沿著裂隙竄升到地表，出現大規模的火山活動，形成「火成岩」，例如世界各大洋底的中洋脊、非洲東非裂谷或紅海。

在「聚合型」板塊邊界，兩個板塊受到相向的力量作用，地殼會相互擠壓碰撞，比重較大的板塊（海洋板塊）會被推擠隱沒到另一比重較小的板塊（大陸板塊）下方。當隱沒板塊下沉到深度80~100公里以下時，岩石會開始熔融成為岩漿，之後再向上竄升到地表，形成火

山（火成岩）。或是，地殼在碰撞過程被擠壓到十數公里深以下，此處溫度與壓力都很高，迫使礦物組合成新的礦物與岩石（變質作用），並產生新的岩石「變質岩」。

至於板塊內部的區域（非板塊邊界），通常長期處在穩定的環境，沒有相互碰撞擠壓的作用，地表僅發生侵蝕風化作用，緩慢將地下岩石曝露到地表，或在低窪處堆積沉積物，形成「沉積岩」。這種環境即使歷經數億年的時間，地表的岩石也不會有太大的改變。